

Pourquoi mesurer la teneur en eau dans les ouvrages en béton ?

A. COURTOIS^{a,b}, F. TAILLADE^c, D. PLACKO^b

a. EDF DTG, Lyon, France, alexis.courtois@edf.fr

b. ENS Paris Saclay, Cachan, France, dominique.placko@satie.ens-cachan.fr

c. EDF R&D, Chatou, France, frederic.taillade@edf.fr

Résumé :

Cet article évoque quelques raisons pour développer des moyens de mesure d'humidité dans les ouvrages en béton, présente des technologies de capteur qu'EDF teste en ce moment sur la maquette VeRCoRs dans ce cadre et propose une démarche pour déterminer les performances métrologiques qu'un capteur de teneur en eau dans le béton devrait atteindre pour compléter l'auscultation actuelle des enceintes de confinement.

Abstract :

This paper discusses some reasons why measuring moisture in concrete structures, reviews sensing techniques which are being tested by EDF on the VeRCoRs mock up for that purpose and proposes a approach to determine the metrological performances a water content sensor should reach in order to complete a standard containment monitoring system.

Mots clefs : teneur en eau, auscultation, enceinte, béton, durabilité, fluage, retrait, séchage, humidité

1 Introduction

Qu'on l'appelle « teneur en eau » ou « humidité », la quantité d'eau présente dans les pores du béton joue un rôle fondamental dans le vieillissement des structures de Génie Civil. En effet, le retrait, le fluage ou les réactions de gonflement interne du béton, pour ne citer que ces phénomènes, en dépendent plus ou moins étroitement. La quasi-unanimité des modèles de comportement intègrent donc une variable liée plus ou moins directement à la teneur en eau ou d'humidité, [1] [2] [3] [4] [5] [6], sans être exhaustif.

Dès lors, mesurer *in situ* la teneur en eau ou l'humidité du béton semblent une idée pertinente pour gagner en précision dans les évaluations de comportement ou de santé structurale des ouvrages. Mais se pose alors la question du matériel : quelles technologies de capteur pour quelle précision de mesure ?

Ces dernières années, EDF a testé plusieurs technologies de mesure, avec des capteurs noyés dans le béton, dont la méthode TDR (Time Domain Reflectometry) et la méthode « Pressure Pulse Decay », dite « pulse » (développée par le LML) [7]. La maquette VeRCoRs est utilisée, entre autres, pour

qualifier ces méthodes [8]. Des essais non destructifs, mis en œuvre depuis la surface, sont aussi envisageables [9]. Néanmoins, peu d'informations sont disponibles pour qualifier les chaînes de mesure du point de vue de l'incertitude de mesure.

Après un rappel des principales techniques de mesures, cette communication propose, une démarche pour estimer l'incertitude à respecter pour une mesure de teneur en eau dans les bétons. Cette démarche sera illustrée dans le cadre de la surveillance des enceintes de confinement en béton précontraint. L'idée de base est d'estimer l'apport de l'information « teneur en eau » pour prédire mieux et plus rapidement les déformations différées (retrait fluage) en fin de vie de l'ouvrage.

2 Pourquoi mesurer la teneur en eau dans les bétons ?

La mesure de teneur en eau d'un béton sur ouvrage peut se concevoir dans différentes perspectives :

- vérifier qu'un béton frais est conforme aux prescriptions,
- estimer les propriétés de transfert effectives (perméabilité, diffusion de la vapeur d'eau...) des matériaux en place pour évaluer la durabilité réelle d'un ouvrage ou son étanchéité,
- recalculer des lois de comportement (retrait, fluage) pour faire des prédictions de durée de vie,
- affranchir certains essais non destructifs en parement (résistivité, polarisation, radar...) de l'influence de l'humidité, pour mieux estimer le risque de corrosion des armatures par exemple,
- estimer la teneur en eau pour évaluer les risques de gonflement résiduel associés à certaines pathologies comme la réaction alcali-granulats ou les réactions sulfatiques internes,
- s'assurer d'un niveau minimal d'eau dans le béton, si la structure a une fonction de protection biologique, par exemple.

Selon l'application visée, l'incertitude de mesure souhaitée peut considérablement varier. Néanmoins un premier ordre de grandeur peut être estimé en se rapprochant des exigences formulées dans les normes d'essai en laboratoire [10] [11]. La démarche consiste donc à peser un échantillon en l'état puis à l'étuver jusqu'à ce que sa masse soit stabilisée et à comparer les deux masses, l'écart provenant de l'eau évaporée. Conventionnellement, la consigne de température est fixée aux environs de 105°C et les normes recommandent une incertitude relative de pesée inférieure à 0,01% de la masse. La détermination de la teneur en eau massique étant basée uniquement sur des pesées, on peut estimer que l'ordre de grandeur de l'incertitude relative sur cette grandeur sera de l'ordre de celle de la pesée, sans entrer dans des calculs détaillés. L'incertitude obtenue pour la mesure de teneur en eau est donc d'environ 0,01%. Ce niveau d'incertitude exige de l'ensemble de la chaîne de mesure des performances notablement élevées.

Néanmoins, on peut considérer le problème d'un point de vue différent si l'on se place dans le cadre de la prédiction de la durée de vie des ouvrages, comme les enceintes de confinement des réacteurs nucléaires d'EDF. Pour ces dernières, il existe un système d'auscultation qui permet d'enregistrer les déplacements et les déformations au cours du temps ou lors des essais en pression décennaux [12]. Dans ce cas, la teneur en eau n'est pas le paramètre d'intérêt principal puisque les jugements sur la santé de l'ouvrage reposent sur les déformations. Ainsi, la teneur en eau est un paramètre secondaire qui constitue une information supplémentaire potentiellement intéressante pour mieux comprendre et prédire le comportement de l'ouvrage. Dans ce cas, l'incertitude maximale que l'on s'autorise pour une mesure de teneur en eau pondérale va directement dépendre de la façon dont on traite cette nouvelle donnée dans le diagnostic de l'ouvrage. Nous illustrerons cette notion plus loin en proposant

une démarche d'identification de cette incertitude cible dans le cadre de la surveillance des enceintes de confinement.

3 Quelques techniques de mesure de teneur en eau dans les bétons qu'EDF a testé sur ses ouvrages nucléaires

Les méthodes de mesures de teneur en eau dans les matériaux poreux, si l'on excepte le prélèvement de carottes pour le traitement en laboratoire selon l'un des normes évoquées plus haut, cherche à évaluer des grandeurs physiques sensibles à l'humidité des matériaux. Parmi elles, la permittivité relative semble une propriété intéressante, le contraste entre celle de l'eau (81 environ à 20°C) et celle d'un solide (entre 3 et 7) permettant théoriquement d'envisager un principe de mesure assez sensible à la présence d'eau. La permittivité relative est une grandeur qui rentre en jeu dans les mesures électromagnétiques [13], comme le radar, la mesure de capacité ou le TDR (Time Reflectometry Domain) sur lequel nous revenons plus loin.

Conscient du rôle de la teneur en eau dans le développement des phénomènes de retrait et de fluage du béton, même si les données scientifiques étaient moins nombreuses qu'aujourd'hui, EDF a tenté dès les années 1980 des expérimentations avec le CEBTP sur les enceintes de Civaux 1 et de Paluel 1. Les capteurs proposés par le CEBTP étaient des sortes de condensateurs de petite taille [14] noyés dans le béton, ce dernier servant de diélectrique.

Le système s'est avéré robuste, fonctionnant depuis plus de 20 ans, avec des ordres de grandeurs cohérents. Les résultats ont été exploités de façon qualitative [15]. En revanche, l'exploitation quantitative de ces mesures est plus délicate, avec une incertitude assez élevée [13] [16].

Après ce résultat mitigé, EDF a conduit avec l'ANDRA, la société EGIS et le laboratoire LML de l'Ecole Centrale de Lille un benchmark en laboratoire [17] qui a abouti à l'identification de deux technologies prometteuses destinées à être « noyées dans le béton des ouvrages » :

- les sondes TDR, déjà identifiés par l'ANDRA pour être testés en vue de la surveillance des ouvrages souterrains de stockage de déchets radioactifs,
- les sondes de perméabilité apparente au gaz, par mesure de décroissance de pression dit « pulse » (développée par le LML).

3.1 Descriptif de la méthode TDR (Time Reflectometry Domain)

La méthode TDR pour la mesure de teneur en eau se fonde sur la dépendance de la permittivité relative d'un milieu solide à l'eau qu'il contient. Cette méthode est notamment utilisée industriellement dans les domaines de l'agriculture et de l'agroalimentaire pour surveiller la teneur en eau des sols ou de denrées diverses.

Le principe est simple : on mesure le temps de vol d'une onde électromagnétique qui se propage à une vitesse inversement proportionnelle à la racine carrée de la permittivité électrique relative du milieu de propagation. Cette permittivité étant elle-même dépendante de la teneur en eau, on peut remonter du temps de vol à la teneur en eau. Actuellement, il est nécessaire de passer par une opération de calibration adéquate pour identifier la relation entre permittivité relative et teneur en eau. Cette

calibration se fait en laboratoire, sur des éprouvettes instrumentées de sondes TDR et soumise à des humidités contrôlées.

Le principe de mesure est illustré par la figure 1 : on envoie une impulsion en entrée, qui se propage dans la ligne électrique que constituent le câble coaxial, la tête puis les tiges du capteur. L'onde est réfléchie et le signal retour est analysé pour en déduire un temps de parcours des électrodes, celui-ci étant fonction de la teneur en eau du béton dans lequel elles sont plongées.

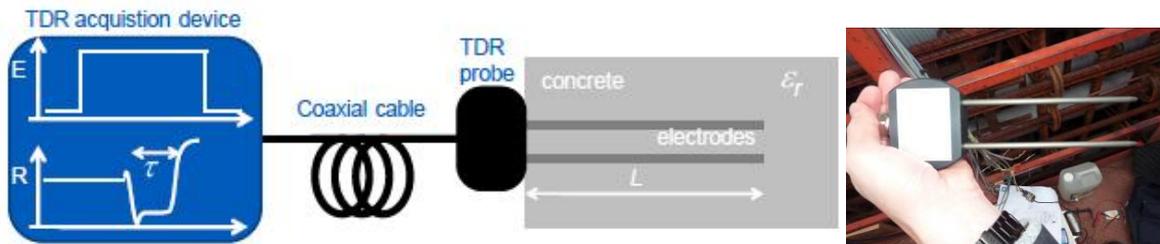


Figure 1 - Principe de la mesure TDR et photo d'un capteur

La mesure se présente sous la forme d'une trace temporelle comme le montre la figure 2. Le temps de parcours est ensuite estimé en mesurant le temps qui sépare les différents pics.

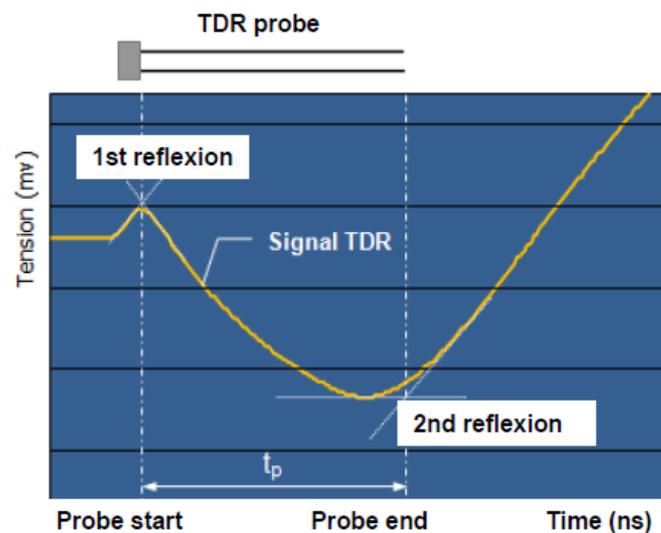


Figure 2 - Exemple de trace TDR et correspondance avec le temps de parcours « t_p »

Lors du séchage du béton, on observe une évolution des courbes qui vont dans le sens d'un temps de vol croissant, comme l'illustre la figure 3.

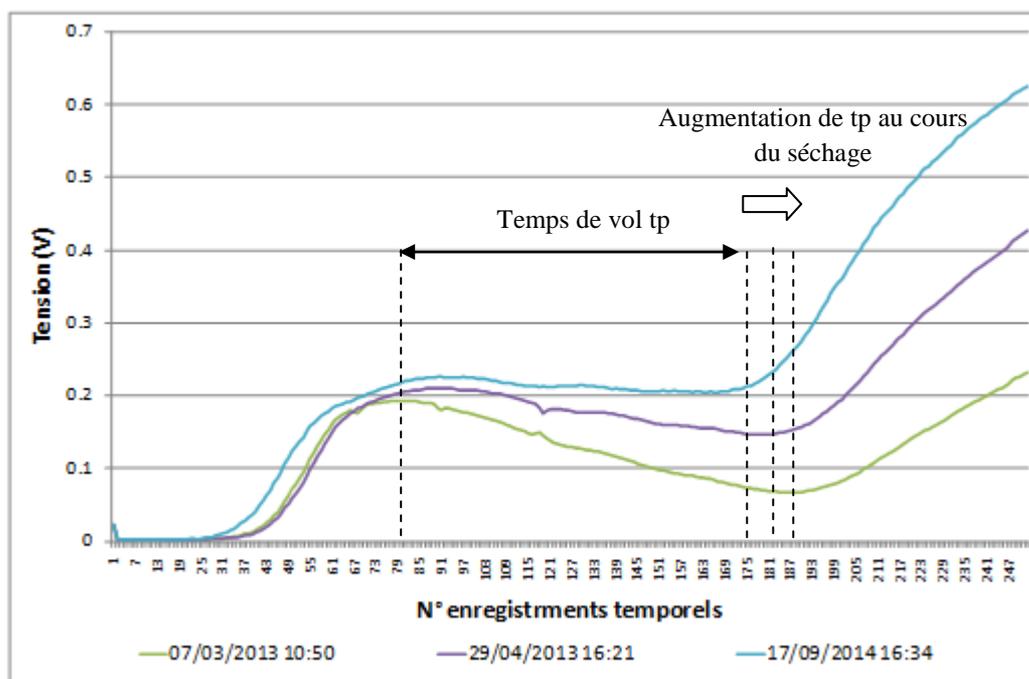


Figure 3 - Exemple de traces TDR obtenus sur ouvrage à différentes dates

3.2 Descriptif de la sonde « pulse »

Le principe de mesure repose sur la dépendance de la perméabilité effective au gaz à la saturation en eau [7]. La perméabilité est mesurée via l'injection de gaz inerte (argon) dans une sonde spécifique noyée dans le béton.

La chaîne de mesure « pulse » est composée de 3 éléments principaux [AGO 16] :

- le capteur, constitué d'un fritté inox d'environ 50 mm de longueur et d'environ 20 mm de diamètre extérieur (figure 4),
- un tube capillaire en inox de diamètre extérieur $\varnothing 1,6$ mm reliant le capteur à un tableau de mesure,
- un tableau de mesure permettant d'injecter du gaz dans le capteur pulse et de mesurer la variation de pression du gaz à l'aide d'un capteur de pression (figure 4).

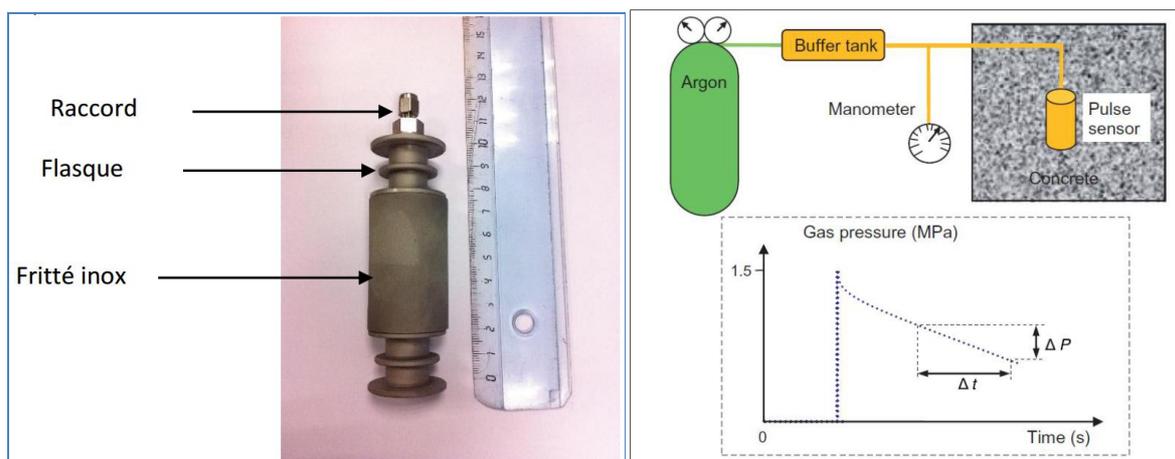


Figure 4 – Photo d'un capteur pulse (à gauche) et principe de mesure associé (à droite)

La mise en pression quasi instantanée d'un volume connu de gaz suivi de la mesure dans le temps de la chute de pression due à la perméation du gaz dans le massif béton permet, après caractérisation en laboratoire et simulation numérique d'estimer la saturation en eau du matériau.

3.3 Les tests en cours sur ouvrages à EDF

EDF a placé des sondes TDR dans l'enceinte de l'EPR de Flamanville 3 [18], sur le terminal méthanier de Dunkerque et dans la maquette VeRCoRs [19]. Par ailleurs, des capteurs pulse ont été installés dans un voile épais de l'EPR Flamanville 3 et d'autres sont exploités pour le suivi de la maquette VeRCoRs [7].



Figure 5 - Sondes TDR (à gauche) et pulse (à droite) mises en place avant bétonnage

4 Proposition d'une méthode pour définir l'exigence de performance métrologique pour l'évaluation de la teneur en eau des bétons

Nous nous plaçons dans le cadre des études de vieillissement des enceintes de confinement, dont l'objectif est de prédire l'état de précontrainte de l'ouvrage en fin de vie, en exploitant notamment les mesures de déformations et de déplacement que fournit le système d'auscultation [12].

L'objectif est de déterminer les performances métrologiques requises pour une éventuelle chaîne de mesure de teneur en eau du béton, quel que soit la méthode de mesure retenue.

Comme nous l'avons évoqué plus haut, la valeur ajoutée de la mesure de la teneur en eau du béton peut être évaluée en observant le gain qu'on obtient en intégrant cette nouvelle mesure au pronostic fait sur la base des mesures de déformations existantes. On peut espérer soit diminuer l'intervalle de confiance des prédictions actuelles de déformations en fin de vie (figure 6), soit gagner du temps en disposant plus rapidement d'une prédiction en fin de vie à un niveau de confiance souhaitée (figure 7).

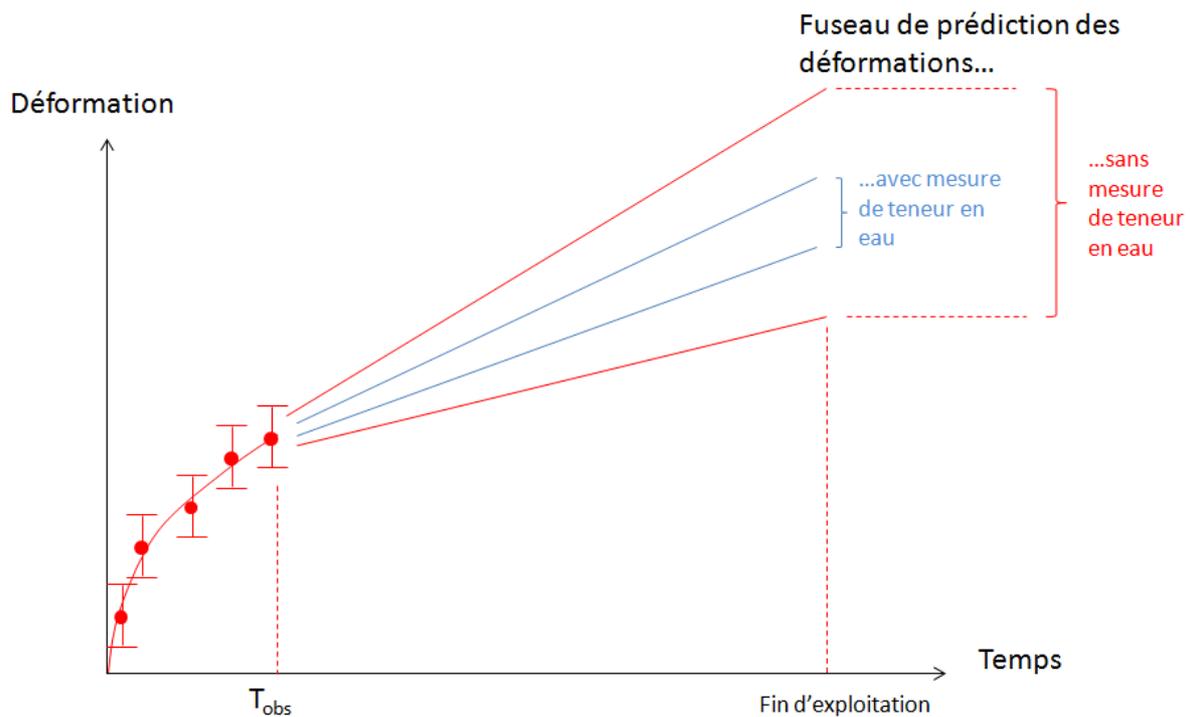


Figure 6 – Illustration du gain en précision du pronostic obtenu en mesurant la teneur en eau dans les enceintes de confinement

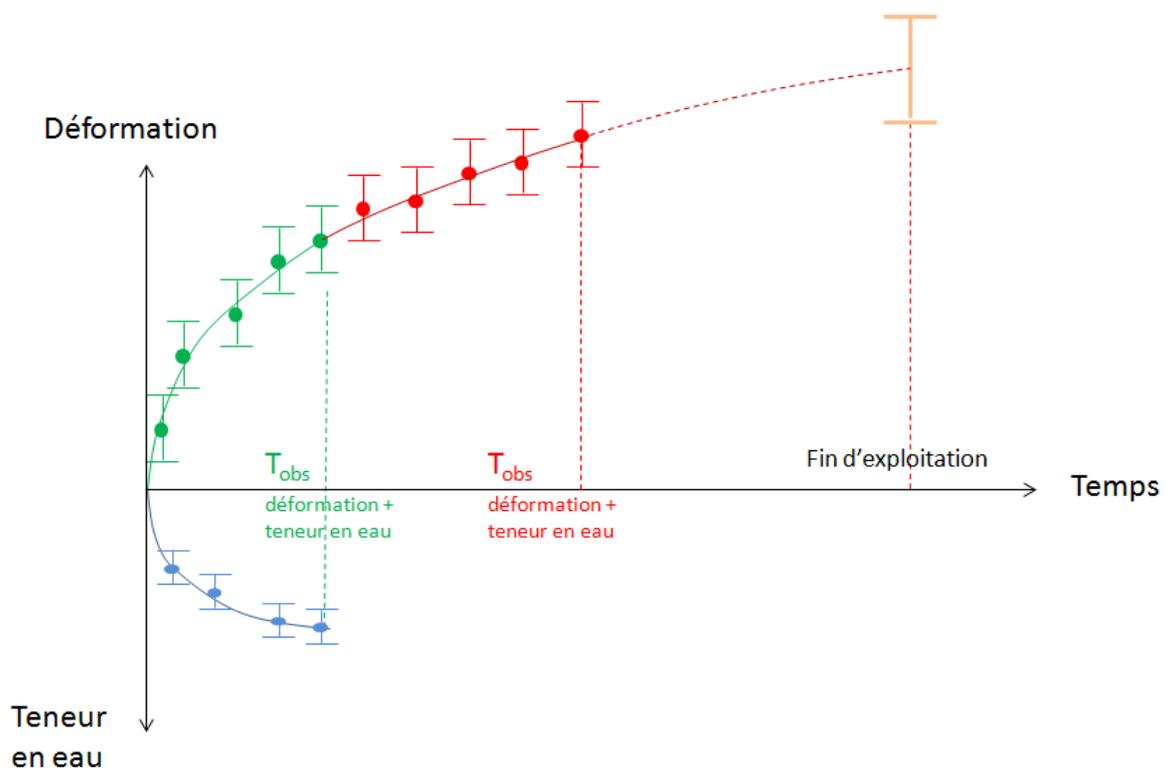


Figure 7 – Illustration du gain en temps dans le pronostic obtenu en mesurant la teneur en eau dans les enceintes de confinement

La démarche consiste donc à comparer la méthode « classique » (extrapolation des mesures de déformation) et la méthode « enrichie » (prédiction réalisée à l'aide d'un modèle de retrait-fluage prenant en compte l'influence de la teneur en eau). Il convient de préciser ces termes avant de s'intéresser au processus de détermination de l'incertitude.

4.1 La méthode classique

La méthode classique consiste à utiliser les seules mesures de déformation et à tenter d'extrapoler les tendances observées en fin de vie, comme l'illustre la figure 8.

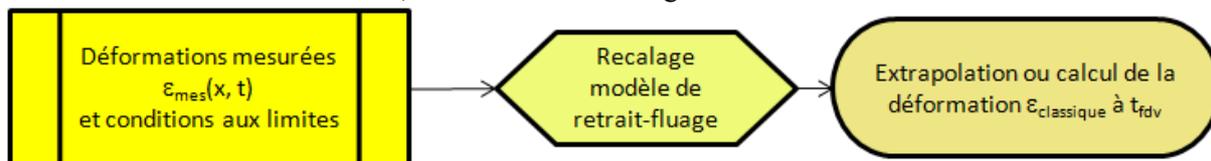


Figure 8 - Méthode « classique » pour extrapoler les déformations différées en fin de vie

L'extrapolation peut s'envisager très simplement en recalant des fonctions simples dépendant du logarithme ou d'une puissance du temps. Ce fut la méthode suivie par l'ingénierie d'EDF dans les années 1990-2000, avant d'utiliser des lois réglementaires et de déterminer leurs paramètres grâce à des mesures *in-situ* des mesures [20] [21]. Récemment, le projet national CEOS.fr (« Comportement et Evaluation des Ouvrages Spéciaux. Fissuration-retrait ») a proposé une démarche d'identification de paramètres des lois de retrait et de fluage pour des structures épaisses sur la base de mesures *in situ* [22] [23], en adaptant les modèles codifiés des Eurocodes et du Code Modèle 2010.

4.2 La méthode « enrichie »

La méthode « enrichie » a pour objectif l'utilisation conjointe des mesures de déformation et de teneur en eau, via une modélisation plus proche de la physique des phénomènes mis en jeu

Dans un premier temps, on détermine les paramètres de la loi de séchage pour laquelle on a optée, via une identification sur la base de mesures de teneur en eau, distribuées dans l'espace (un ou plusieurs capteurs dans l'ouvrage) et dans le temps (selon la fréquence d'acquisition des mesures). Cette identification donne accès aux paramètres de transport (diffusion, ou perméabilité, selon le modèle choisi) qui permettent de simuler la teneur en eau à tout moment dans l'histoire de l'ouvrage, notamment à la date des mesures de déformation et en fin de vie. Grâce à ces estimations, les paramètres du modèle mécanique de retrait-fluage peuvent eux-mêmes être inversés en utilisant les mesures de déformation. Enfin, une estimation de la déformation recherchée en fin de vie peut être réalisée par le modèle mécanique (figure 9).

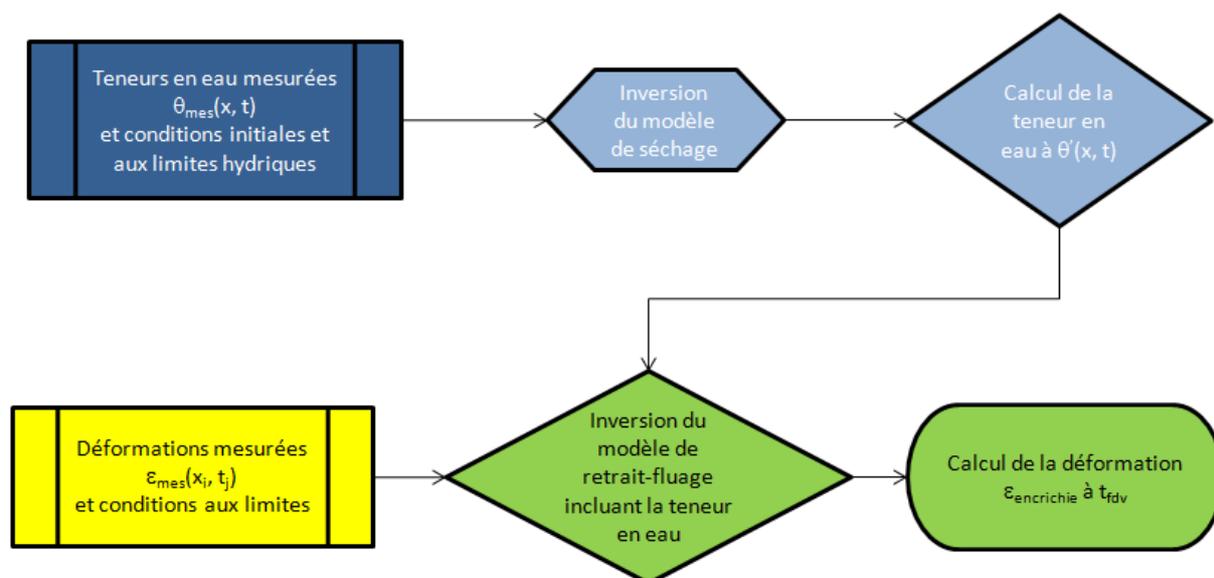


Figure 9 - Méthode « enrichie » pour extrapoler les déformations différées en fin de vie, en exploitant un modèle physique intégrant la teneur en eau

4.3 Détermination de l'incertitude cible

L'incertitude cible que nous recherchons correspond à un seuil en dessous duquel la mesure de teneur en eau complète avec une plus-value significative l'information déjà apportée par la mesure de déformation, permettant ainsi de mieux appréhender et mieux prédire le comportement de l'ouvrage. Pour bâtir une démarche d'estimation de cette incertitude cible pour la mesure de teneur en eau, il faut donc d'abord établir un critère qui pèsera l'apport de l'information « teneur en eau » dans le processus d'auscultation.

Ce critère dépend bien évidemment de l'application visée. Pour celle qui nous concerne, nous proposons de le formuler ainsi, en supposant arbitrairement une fin d'exploitation de l'ouvrage à 50 ans : « l'incertitude sur la prédiction de déformation en fin d'exploitation établie sur la base des mesures de déformation et de teneur en eau (méthode enrichie) enregistrée pendant 5 ans doit être inférieure ou égale à l'incertitude de la prédiction réalisée avec la méthode classique à partir de 25 ans de mesure de déformation ». Autrement dit, on gagne ici 20 ans sur le pouvoir prédictif du modèle, à qualité de pronostic constante.

Il faut ensuite définir un protocole qui permette de faire propager l'incertitude de la mesure de teneur en eau dans le modèle de prédiction des déformations et de préciser son influence sur le résultat final. Cette démarche met finalement en jeu deux incertitudes qu'il faut modéliser :

- l'incertitude sur la prédiction de la déformation en fin de vie de l'approche classique, avec la difficulté supplémentaire qu'elle n'est pas toujours explicitée dans la pratique courante,
- l'incertitude sur la mesure de teneur en eau, qui est le paramètre que l'on cherche à ajuster pour faire diminuer l'incertitude précédente via l'approche enrichie.

Nous avons choisi de modéliser la propagation des incertitudes par la méthode de Monte Carlo à partir de la génération aléatoire de mesures de teneur en eau et de déformation selon des lois de distributions types. Ces mesures « synthétiques » viennent alors actualiser les modèles prédictifs et la distribution de la déformation obtenue est alors assimilée à l'incertitude de la prédiction. On peut alors régler les lois de distributions de la variable aléatoire « mesure de teneur en eau » pour ajuster la distribution « prédiction de déformation en fin de vie » selon le critère préétabli (figure 10).

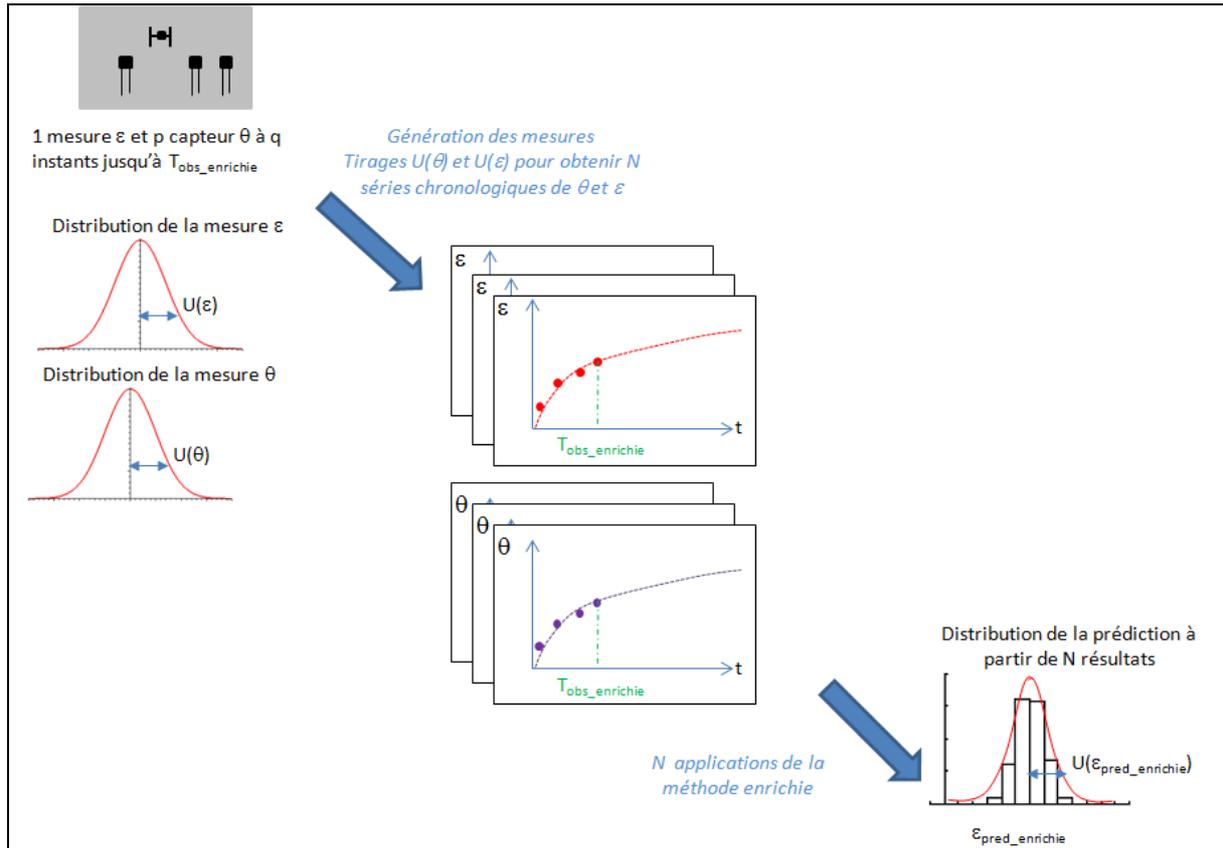


Figure 10 - Démarche de propagation des incertitudes pour la méthode « enrichie ».

5 Conclusion et perspectives

Cet article donne un aperçu des travaux qu'EDF a entrepris pour mesurer la teneur en eau des bétons *in situ*, via notamment une instrumentation noyée déjà mise en place sur plusieurs ouvrages. Deux technologies ont été testées, sondes TDR et capteur « pulse », mais il existe d'autres méthodes prometteuses, parmi lesquelles des méthodes non destructives applicables aux structures existantes.

Cet article vise également à proposer une réflexion sur l'estimation du niveau d'incertitude que les chaînes de mesures d'humidité doivent atteindre pour une utilisation pertinente et fiable dans les études de durée de vie notamment. La démarche proposée implique l'emploi de modèles adaptés à l'intégration d'une mesure de teneur en eau de béton et repose sur le gain en précision ou en temps que cette nouvelle mesure peut permettre.

Cette démarche sera bientôt mise en œuvre pour aboutir à des ordres de grandeurs fiables d'incertitude cible de mesure de teneur en eau. On pourra alors, dans un second temps, vérifier si les capteurs identifiés ainsi que leur chaîne de mesure répondent à ces exigences métrologiques.

Références

- [1] L. Granger, Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires : Analyse et modélisation, Thèse, ENPC, 1995.
- [2] F. Benboudjema, Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales. Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs des centrales nucléaires, Thèse, Université de Marne la Vallée, 2002.
- [3] S. Poyet, Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice : Approche expérimentale et modélisation numérique multi-échelles des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable, Thèse, Université de Marne la Vallée, 2003.
- [4] E. Grimal, Caractérisation des effets du gonflement provoqué par la réaction alcali-silice sur le comportement mécanique d'une structure en béton. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse. 2007.
- [5] A. Sellier, L. Buffo-Lacarrière. Vers une modélisation simple et unifiée du fluage propre, du retrait et du fluage en dessiccation du béton, *European Journal of Environmental and Civil Engineering (EJECE)*, volume 13(10), (2009) 1161-1182.
- [6] A. Hilaire, Etude des déformations différées des bétons en compression et en traction, du jeune au long terme, Thèse, ENS Cachan Paris Saclay, 2014.
- [7] F. Agostini & al., Monitoring of Gas Permeability and Water Content in Large Concrete Structures: a New Method based on Pressure Pulse Testing, in: proceedings of TINCE 2016 conference, Paris, France, 2016.
- [8] Corbin Manuel, Masson Benoit, Garcia Mélanie, Vercors mock up – First experimental results and synthesis of the benchmark, in: proceedings of TINCE 2016 conference, Paris, France 2016.
- [9] site internet de l'IFSTTAR Auscultation non destructive, surveillance et gestion durable des ouvrages - <http://www.ifsttar.fr/collections/ActesInteractifs/AIII/index.html>
- [10] Norm NF P18-459. Béton Essai pour béton durci. Essai de porosité et de masse volumique. 2010.
- [11] Norme NF EN12390-7. Essais pour béton durci. Partie 7 : Masse volumique du béton durci. 2012.
- [12] A. Courtois, J.-M. Hénault, A. Simon, Y.-L. Beck, J. Salin. La surveillance en exploitation des enceintes de confinement et des aéroréfrigérants à tirage naturel du parc nucléaire d'EDF. *Revue Générale du Nucléaire* n°2; Mars-Avril 2011, 49-59.
- [13] A. Courtois, F. Taillade, G. Moreau, T. Clauzon, Skoczylas, B. Masson. Water content monitoring for nuclear concrete buildings: needs, feedback and perspectives. In: 5th Biot Conference on Poromechanics, 10-12 July 2013, Vienna, Austria, pp. 1654-1663.
- [14] J. Paquet. Mesure de l'humidité in-situ par les méthodes diélectriques – Application au béton. *Matériaux et Constructions* n°20, vol. 4. 1971.
- [15] A. Courtois, P. Wyniecki, B. Masson, O. Guyon. Simulation numérique du séchage et du retrait de dessiccation d'une paroi d'enceinte de Confinement. Comparaison aux mesures en laboratoire et *in situ*. in : Colloque Transferts , Lille, France, 2006.
- [16] CEBTP. Étude concernant la teneur en eau du béton de l'enceinte interne des CNPE de Civaux 1 et Paluel 2. Calcul de l'incertitude des mesures de teneur en eau. Rapport technique, 2006.
- [17] G. Moreau, J.-P. Dubois, F. Agostini, J. Salin, B. Masson, F. Skoczylas. Survey of the future concrete structures lifetime measuring the water content: four types of embedded sensor under checking, in: International Symposium Fontevraud 7 - Contribution of materials investigations to improve the safety and performance of LWRs, Avignon, France, 2010.
- [18] T. Clauzon, F. Martinot, G. Moreau, J.-M. Hénault Courtois A., EPR Flamanville 3: A technical showcase for innovation in the EDF Group, in Proceedings of SMIRT 23 conference, Manchester, U.-K., 2015.

- [19] E. Oukhemanou, S. Desforges, E. Buchoud, S. Michel-Ponnelle, A. Courtois, VeRCoRs Mock-Up: Comprehensive Monitoring System for Reduced Scale Containment Model, in: proceedings of TINCE 2016 conference, Paris, France 2016.
- [20] G. Heinfling, A. Courtois, E. Viallet, Reliability based approach to predict the long-time behaviour of prestressed concrete containment vessels, in: Proceedings of Concreep-7, Nantes, France, 2005.
- [21] D. Chauvel, J.-P. Touret, Barré F., Assessment of long term concrete deformations of nuclear structures based on in situ measurements, in: F. Darve et al (ed.), Proceedings of the first Euromediterranean symposium on advances in geomaterials and structures, Hammamet, Tunisia, 2006.
- [22] F. Barré, D. Chauvel, J.-F. Coste, R. Ragouin, C. Rospars, J.-M. Torrenti, Enhancement of the assessment of the concrete creep and shrinkage strains, in: proceedings of TINCE 2014 conference, Paris, France, 2014.
- [23] Recommandations pour la maîtrise des phénomènes de fissuration. Projet CEOS.fr. Presse des Ponts, Paris, France. 2015